

⑨ 日本国特許庁(JP)

⑩ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報(A) 平3-214123

⑤ Int. Cl.<sup>3</sup>

G 02 F 1/35  
H 01 S 3/096  
H 04 B 10/00

識別記号

庁内整理番号

7246-2H  
6940-5F

⑬ 公開 平成3年(1991)9月19日

8523-5K H 04 B 9/00

Z

審査請求 有 請求項の数 4 (全9頁)

⑭ 発明の名称 光ソリトン発生方法およびソリトン伝送方法

⑮ 特 願 平2-9546

⑯ 出 願 平2(1990)1月19日

⑰ 発 明 者 中 沢 正 隆 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内  
⑱ 発 明 者 鈴 木 和 宣 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内  
⑲ 発 明 者 木 村 康 郎 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内  
⑳ 出 願 人 日本電信電話株式会社 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号  
㉑ 代 理 人 弁理士 志賀 正武

明 細 書

1. 発明の名称

光ソリトン発生方法およびソリトン伝送方法

2. 特許請求の範囲

(1) 半導体レーザに供給する電流の値を正弦的もしくはパルス的に変化させることにより発生する光パルスを帯域制限した狭帯域光フィルターを通過させてパルス幅とそのスペクトル幅との積が0.32~0.44となる光パルスに変換し、次いで、該光パルスをエルビウムファイバー増幅器を用いて光増し、そのピーク出力Pが

$$P = 0.776 \times \frac{\lambda^2}{\pi^2 n_r C} \times \frac{|D|}{\tau^2} \times A_{eff}$$

( $n_r$ :非線形屈折率、 $\lambda$ :光パルスの波長、 $\tau$ :光パルスの半値全幅、 $|D|$ :光ソリトンを伝搬させる光ファイバの群速度分散、 $A_{eff}$ :光ソリトンを伝搬させるファイバの有効断面積、 $C$ :光速)で与えられる光ソリトンパルス列を得ることを特徴とする光ソリトン発生方法。

(2) 前記狭帯域光フィルターと前記エルビウムファイバー増幅器との間に時分割多重用の1:1分岐比の3dB光結合器を複数個連続して結合し、時間遅延を与えられることにより、2<sup>m</sup>倍の光ソリトンパルス列を得ることを特徴とする請求項1記載の光ソリトン発生方法。

(3) 前記半導体レーザに供給する電流を正弦的もしくはパルス的に変化させる代りに、コード化されたパルス信号を直接供給することにより、コード化された光ソリトンパルス列を請求項1記載の光ソリトン発生方法により発生させ、その発生した光ソリトンパルス列を長尺の単一モードファイバを通過させ、さらに高速の光検出器により検出することにより光通信を行なうことを特徴とするソリトン伝送方法。

(4) 請求項1記載の光ソリトン発生方法により得られた光ソリトンパルス列をLiNbO<sub>3</sub>もしくはMQW(多重量子井戸構造)半導体を用いた吸収型の光強度変調器によりコード化し、このコード化した光ソリトンパルス列を長尺の単一モードファ

## 特開平3-214123 (2)

イバを通過させ、さらに高速の光検出器により検出することにより光通信を行なうことを特徴とするソリトン伝送方法。

## 3. 発明の詳細な説明

## 「産業上の利用分野」

本発明は半導体レーザからの光パルス発生において、従来発生が不可能であった光ソリトンパルスを簡単な干渉計によりフィルタリングすることにより発生させるとともに、光ファイバー内を伝搬させるソリトン発生方法およびソリトン伝送方法に関する。

## 「従来の技術」

① 第9図はカラーセンターレーザによる光ソリトン発生方法を説明するための図である。この図において、1はモード同期YAGレーザで励起された波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯の光パルスを発生するカラーセンターレーザ、2,2は各々結合レンズ、3はソリトン伝送用ファイバー(単一モードファイバー)、4は光検出器である。

カラーセンターレーザ1から発生する光パルス

れる。また、同図(ハ)に示すように、ピークパワーが $1.2\text{W}$ の場合には、出力パルスの波形が入力光パルスと同一になっていることがわかる。すなわち、このソリトン伝送用ファイバー3では、ピークパワー $P=1.2\text{W}$ にて $N=1$ ソリトンが励振されることがわかる。一方、同図(ニ)、(ホ)に示すように、ピークパワー $P$ を $5\sim 11.4\text{W}$ と増加させた場合には、高次ソリトンが励振されている様子がよくわかる。

② 次に、第11図は正弦波変調による短パルスの発生方法を説明するための図である。この図において、5は正弦波発生器、6は電気増幅器、7は半導体レーザである。なお、結合レンズ2およびソリトン伝送用ファイバー3は上記構成のものと同様である。

この方法では、半導体レーザ7を正弦波変調することにより、パルス列を高繰り返しで発生させて、ソリトン伝送用ファイバー3に導びくようにしている。

③ 次に、第12図はコムジェネレータによる短

は、そのパルス幅が約 $10\text{ps}$ 程度であり、ピークパワーが $100\text{W}$ にも達するため、容易にソリトン伝送用ファイバー3内に数 $10\text{W}$ のパルスパワーのものを励起できる。 $N=1$ で表わされる基本光ソリトンの波形は $\text{Sech}(\tau)$ の形をしているが、カラーセンターレーザ1からの出力波形も、ほぼ $\text{Sech}(\tau)$ で表わされるため、容易に光ソリトンパルスが発生する。なお、光ソリトンに関しては、中沢正隆「光ファイバー中の非線形光学」応用物理第56巻、第10号、P.1265~P.1288(1987)もしくは「光パルスの伝播とソリトンレーザ」レーザ研究、解説、第15巻11号P.869~886頁(1987)を参考。

この方法により得られる光ソリトンの波形の変化を第10図に示す。この場合、ソリトン伝送用ファイバー3の長さが $700\text{m}$ である。また、入力光パルスは第10図(イ)に示すようになっている。まず、同図(ロ)に示すように、ピークパワー $P$ が $0.3\text{W}$ の場合には、明らかに入力光パルスに対して出力パルスのパルス幅の広がりが見測さ

パルスの発生方法を説明するための図であり、この図に示すように、電気増幅器6と半導体レーザ7との間にコムジェネレータ8が挿入されている。このコムジェネレータ8により電気パルスにて半導体レーザ7を駆動し、光パルスを数 $\text{GHz}$ の高繰り返しで発生させる。

④ 次に、第13図は光変調器によるパルスの発生方法を説明するための図である。この図に示すように、半導体レーザ7を直流電源9で駆動してCW光を取り出し、この取り出したCW光を、 $\text{LiNbO}_3$ もしくはMQW(多層量子井戸構造)半導体のシュタルク効果を用いた超高速光変調器10によって変調する。これにより、 $5\sim 10\text{GHz}$ の繰り返しのパルス列が得られる。

## 「発明が解決しようとする課題」

ところで、上述した従来の各方法のうち、①項の方法にあっては、光ソリトンの発生にカラーセンターレーザ1を用いるが、その繰り返ししが $100\text{MHz}$ 程度と低いことと、大型で高価であることから実用的な立場から難しいという問題があ

## 特開平3-214123 (3)

る。

また、②および④項の方法にあっては、いずれも理想的なトランスフォームリミットなパルスが得られない。すなわち、10～30 ps程度のパルスが発生できるものの、スペクトル幅が大きく広がるので、パルス幅 $\Delta\tau$ とスペクトル幅 $\Delta\lambda$ との積が $\Delta\lambda\Delta\tau=1\sim3$ 程度となる。このことは、トランスフォームリミットなパルスの条件である $\Delta\lambda\Delta\tau=0.32\sim0.44$ からはかなり外れるので、長距離に亘ってソリトン伝送用ファイバー3中を伝搬させると、パルスが同ファイバー3の群速度分散によって広がってしまい、情報が伝えられないという大きな問題がある。

また、④項の方法にあっては、パルス幅が100 psと広くソリトンとしての利点がない。

本発明は上述した事情に鑑みてなされたもので、上述した各問題点を解決することができる光ソリトンの発生方法およびソリトン伝送方法を提供することを目的としている。

「課題を解決するための手段」

以下、図面を参照して本発明の実施例について説明する。

第1図は本発明の第1実施例を説明するための図である。なお、この図において前述した第9図、第11図および第12図各々と共通する部分には同一の符号を付けてその説明を省略する。この図において、11はパルス信号発生器、12はパルス信号発生器11の基本波成分のみを通過させる電気ローパスフィルター、13は狭帯域光フィルター(例えば、ファブリペロー干渉計やマッハツェンダ干渉計、この実施例ではファブリペロー干渉計を使用している)、14は半導体レーザ光と、エルビウム励起用光源15から出力される光信号とを合波するための光カップラー、16は上記エルビウムファイバー、17は信号の光パルス以外の自然放光雑音を取り除くための自然放光除去用光フィルターである。

上記構成において、まず、パルス信号発生器11からパルス信号が出力されると、電気ローパスフィルター12によってその基本波成分のみが取

本発明は、半導体レーザの直接変調によって得られる高繰り返しパルス列をファブリペローもしくはマッハツェンダ干渉形フィルターを通過させることによりトランスフォームリミットなパルスに変換し、それをエルビウムファイバ増幅器によってこのパルス列を増幅し、光ソリトンを得る。そして、得られたソリトンパルス列を直接変調することによってソリトン伝送を行う。

「作用」

半導体レーザの直接変調によって高繰り返しパルス列が得られる。そして、得られたパルス列のスペクトルが制御され、パルス幅 $\Delta\tau$ とそのスペクトル $\Delta\lambda$ との積が $\Delta\tau\Delta\lambda=0.32\sim0.44$ となるトランスフォームリミットなパルス化が行なわれる。そして、それをさらに光増幅することによって、超高繰り返しソリトンパルス列が得られる。次いで、得られたソリトンパルス列を直接変調することによって、ソリトン伝送が行なわれる。

「実施例」

り出される。そして、その基本波成分が電気増幅器6によって増幅され、半導体レーザ駆動用パルスとして、半導体レーザ7に供給される。これにより、半導体レーザ7が駆動する。ここで、半導体レーザ7に供給される半導体レーザ駆動用パルスの生成される様子を第2図に示す。同図(イ)はパルス信号発生器11の出力波形を示し、同図(ロ)は電気ローパスフィルター12の出力波形を示す。また、同図(ハ)は電気増幅器6の出力波形を示す。一方、第3図に半導体レーザ7の出力を示す。同図(イ)はそのスペクトルを示し、同図(ロ)はパルスの時間波形を示す。これら図(イ)、(ロ)に示すように、実験ではパルス幅が $\Delta\lambda=1.5\text{ nm}$ 、時間幅が $\Delta\tau=2.4\text{ ps}$ が得られている。

ところで、半導体レーザ7へ電子を注入を行なうと屈折率が下がるので、レーザの発振周波数は第4図に示すように、一度、長波長側にチャープしてもとに戻る(これを負またはダウムチャープと呼ぶ)。なお、トランスフォームリミットなパルスとは、パルスのフーリエ変換によって得られ

る幅だけのスペクトルを有するパルスのことであり、余分なスペクトルを含まないパルスのことである。

一般に、半導体レーザーでは波形がガウス形であり、スペクトル幅 $\Delta\lambda$ とパルス幅 $\Delta\tau$ の間には、

$$\Delta\lambda\Delta\tau = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \times \frac{C}{\lambda} \times \Delta\tau = 0.44 \quad \dots\dots ①$$

の関係がある。第3図で得られたパルスの $\Delta\lambda$ ・ $\Delta\tau$ 積を計算すると、

$$\Delta\lambda\Delta\tau = \frac{1.5 \times 10^{-9} \times 340^{\circ}}{(1.54 \times 10^{-6})^2} \times 24 \times 10^{-12} \\ = 4.6 \quad \dots\dots ②$$

となり、①式の結果と比べると約10倍の大きさをもっていることがわかる。従って、直接変調によって得られるパルスはトランスフォームリミットからは程遠い。これが半導体レーザーの直接変調のもつ本質的な欠点である。

本発明では、この半導体レーザーのチャープ特性に着目し、ファブリペロー干渉計13を用いてスペクトルをトランスフォームリミット化する。この場合、実験ではファブリペロー干渉計13の透

入すると、トランスフォームリミットなパルスが得られる。しかし、このままでは、透過出力が約5~10dB低下してしまう。この原因としては、一つ目には、スペクトル幅を制限することによる損失、2つ目には、ファブリペロー干渉計13の透過損失があるからである。実験においてはファブリペロー干渉計13のフリースペクトルレンジが約6nmになるように設定した。すなわち、フリースペクトルレンジを $\Delta\lambda$ とすると、

$L = 200 \mu\text{m}$  のとき

$$\Delta\lambda = \frac{C}{2L} \times \left( \frac{\lambda^2}{C} \right) \\ = \frac{(1.54 \times 10^{-6})^2}{2 \times 200 \times 10^{-6}} \\ = 6 \text{ nm} \quad \dots\dots ③$$

である。従って、Distributed Feedback Laser (DFB) の場合、単一スペクトル発振 (チャープは含む) であり、その幅は広くとも2nm程度であるから、6nmのフィルター間隔があれば充分である。すなわち、他のフィルター成分が入ってこない。ファブリペロー干渉計13の帯域に関しては、ファ

#### 特開平3-214123 (4)

過帯域を0.22nmに設定して、挿入したところ約17psのパルスにファブリペロー出力として変換できた。この出力の $\Delta\lambda\Delta\tau$ 積を見積ると、

$$\Delta\lambda\Delta\tau = \frac{0.22 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^9}{(1.54 \times 10^{-6})^2} \times 17 \times 10^{-12} \\ = 0.47 \quad \dots\dots ④$$

となり、この値は①式の結果に非常に近く、トランスフォームリミットなパルスが得られていることを示している。もともとチャープパルスであるから0.22nmの幅でも原理的には僅かなチャープがあるが、このチャープを完全に補償するにはファブリペロー干渉計13と光カップラー14との間に負のチャープ補償用の正常分散をもつ光ファイバーを挿入すればよい。例えば、0.2nmの帯域で2psのチャープが存在すると、10ps/nmであるが、これは零分散波長を1.6~1.8 $\mu\text{m}$ 帯にシフトしたファイバーの分散量が50ps/km/nmであることを用いて、本補償用の光ファイバーの長さを200mにすると良い。

このようにしてファブリペロー干渉計13を挿

入すると、ファブリペロー干渉計13を構成する鏡の反射率を適当に設定することによりフィネスを、0.1~1nm程度の帯域に調整すればよい。

以上のようにすることによって、パルス出力は弱い完全にトランスフォームリミットなパルス列ができる。

次に、これらをソリトンパルス列のパワーレベルまで光増幅する。それをエルビウムファイバー増幅器(光カップラー14、エルビウム励起用光源15およびエルビウムファイバー16の組み合わせ)により行う。ここで、 $N=1$ の標準ソリトンのパルスピークパワーを $P_{N=1}$ とすると $P_{N=1}$ は

$$P_{N=1} = 0.776 \times \frac{\lambda^2}{\pi^2 n_2 C} \times \frac{|D|}{\tau} \times A_{\text{eff}} \quad \dots\dots ⑤$$

この場合、 $n_2$ は非線形屈折率、 $\lambda$ は光パルスの波長、 $\tau$ は光パルスの半値全幅、 $|D|$ はソリトン伝送用ファイバー3の群速度分散、 $A_{\text{eff}}$ はソリトン伝送用ファイバー3の有効断面積、 $C$ 光速である。

## 特開平3-214123 (5)

ファブリペロー干渉計13の出力としてはピークパワーが1mW程度である。ソリトンを送送するソリトン伝送用ファイバー3の規格としては、例えば $|D| = 3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$ の分散シフトファイバーを用い、 $A_{\text{eff}} = 4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ に設定できるため、入力 $\tau = 20 \text{ ps}$ のパルスであると、シリカ系ファイバーの $n_1$ が $n_2$ で与えられることを考慮すると、 $P_{\text{sol}}$ は

$$P_{\text{sol}} = 0.776 \frac{(1.55 \times 10^{-3})^2}{(\pi)^2 \times 3.2 \times 10^{-18} \times 3 \times 10^8} \cdot \frac{3 \times 10^{-6}}{(20 \times 10^{-12})^2} \cdot 4 \times 10^{-11} = 9.2 \text{ mW} \quad \dots \dots \textcircled{5}$$

となる。すなわち、上記のパワーがあれば $N=1$ のSech形ソリトンが長尺のソリトン伝送用ファイバー3を伝搬することができる。

次に、必要なエルビウムファイバー増幅器の利得は式⑤と、入力1mWの条件より10dB程度でよいことになる。この場合、第5図に示すように、20dB以上の利得が3~1000程度のエルビウムファイバーにおいて容易に得られるため、本方法は非常に有効なことがわかる。なお、本増幅の

詳細については中沢正隆、光学、18巻6号P. 291~P. 296「光ファイバーによる光増幅」を参考。

エルビウム励起用光源15の波長としては、0.5 $\mu\text{m}$ 、0.6 $\mu\text{m}$ 、0.8 $\mu\text{m}$ 、0.98 $\mu\text{m}$ および1.48 $\mu\text{m}$ 等がある。第5図は、1.48 $\mu\text{m}$  InGaAsP半導体レーザを励起光源として得られている。

ここで、信号光以外の自然放出光による雑音は自然放出光除去用光フィルター17で除去される。また、その他の雑音として非ソリトンの成分がソリトン伝送用ファイバー3に損失があるため僅かに発生する。しかし、これも過飽和吸収体、例えばInGaAs系のMQW半導体を自然放出光除去用フィルター17に付加することにより、ソリトン部分は完全に透過し、非ソリトン部分は完全に吸収して、安定なソリトンを送送することができる。その様子を第6図に示す。同図(イ)は過飽和吸収体通過前、同図(ロ)は通過後で完全に雑音が除去できていることがわかる。

このようにして得られたパルスはソリトンとしてソリトン伝送用ファイバー3を伝搬した後、ブリエンファシス法(特願平1-68619 光ソリトン伝送方式、久保田寛和、中沢正隆、鈴木和彦)により再生中継された後、最終的に光検出器4で情報が取り出され、ソリトンによる光通信が完了する。

次に、本発明の第2実施例について説明する。この第2実施例は、超高繰り返しソリトンパルス列を1:1の結合の光カップラーを複数個用い、もとの半導体レーザ7のパルス繰り返しの $2^{N-1}$ 倍に時間軸上で多重化する方法である。第7図にその構成を示す。パルス信号発生器11および電気増幅器6によって正弦波変調された電気信号により半導体レーザ7をパルス駆動し、そのスペクトル成分を狭帯域化して3dBカップラー群18に導く。N個のカップラーが用いられると、 $2^{N-1}$ 倍に時間軸上で多重化することができる。

ここで、時間遅延を発生させパルスの多重化を図るために接続した3dBカップラーの2つの腕

の片方の長さを変化させている。3dBカップラーの腕の長さの差は半導体レーザ7の繰り返し周期をTとすると、時間遅延が $T/2^i$  ( $i=1, 2, \dots, N-1$ )となるよう設定する。例えば、50psの時間遅延を与えるためには1cmのずれを与えればよい。このようにして容易にパルスの多重化が可能となる。しかし、この場合、N個の3dBカップラーを通過することによりパルスのピーク強度は $1/2$ に低下するが、前述したエルビウムファイバー増幅器により補償することが可能である。本方法で多重化した場合は、超高速光変調器10によって信号のON・OFFを行う。これにより超高速光ソリトン通信が可能となる。

次に、第8図は本発明の第3実施例を説明するための図であり、第7図と同様に半導体レーザ7を直接変調する代りにLiNbO<sub>3</sub>光変調器もしくはMQWの半導体を用いた吸収型光変調器10aをファブリペロー干渉計13と光カップラー14との間を挿入し、これにより光ソリトンのON・OFFを行なう。本方法は吸収型光変調器10a

## 特開平3-214123 (6)

を用いる必要があるが、半導体レーザ7を直接変調する必要がないという利点がある。

## 「発明の効果」

以上説明してきたように、従来、不可能とされてきた半導体レーザからトランスフォームリミットな高出力ソリトンパルスの発生をファブリペロー干渉計等の狭帯域フィルタとエルビウムファイバ増幅器を用いることによって実現できるので、光の強度変調を用いる通信に幅広く適用することができるという利点がある。すなわち、従来、高速の光通信には不可欠であったLiNbO<sub>3</sub>もしくはMQWの半導体による高速光変調器が不必要になり、単に半導体レーザを高速に直接変調すればよい。したがって、光ソリトン伝送システムが非常に簡便なものとなる利点がある。

もしも仮に、パルスコードで半導体レーザを直接変調した場合にパルス波形が乱れるならば、高速光変調器を狭帯域フィルタとエルビウムファイバ増幅器との間に挿入すればよい。この場合、半導体レーザを直接変調しないので、より安定な

ソリトン伝送が可能となる可能性がある。

また、本方法は、例えば30～100GHz程の超高速繰り返しになっても、半導体レーザの直接変調がその周波数帯において可能な限り、トランスフォームリミットなソリトンパルスが実現できるので、大変有効である。

## 4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明の第1実施例を説明するための図、第2図は半導体レーザ(7)を駆動するための回路とその各部の出力を示す波形図、第3図は半導体レーザ(7)の出力波形図、第4図は半導体レーザ(7)のチャープ特性を示す図、第5図はエルビウムファイバ増幅特性を示す図、第6図は過飽和吸収体を用いた非ソリトン成分の除去法を説明するための図、第7図は本発明の第2実施例を説明するための図、第8図は本発明の第3実施例を説明するための図、第9図はカラーセンターレーザ(1)による光ソリトンの発生方法を説明するための図、第10図は第9図に示す構成により発生するソリトンの波形変化を説明するための図、

第11図は正弦波変調による短パルス発生方法を説明するための図、第12図はコムジェネレータによる短パルス発生法を説明するための図、第13図は光変調器によるパルスの発生方法を説明するための図である。

16……エルビウムファイバ、  
17……自然放出光除去用光フィルタ、  
18……3dBカップラ群。

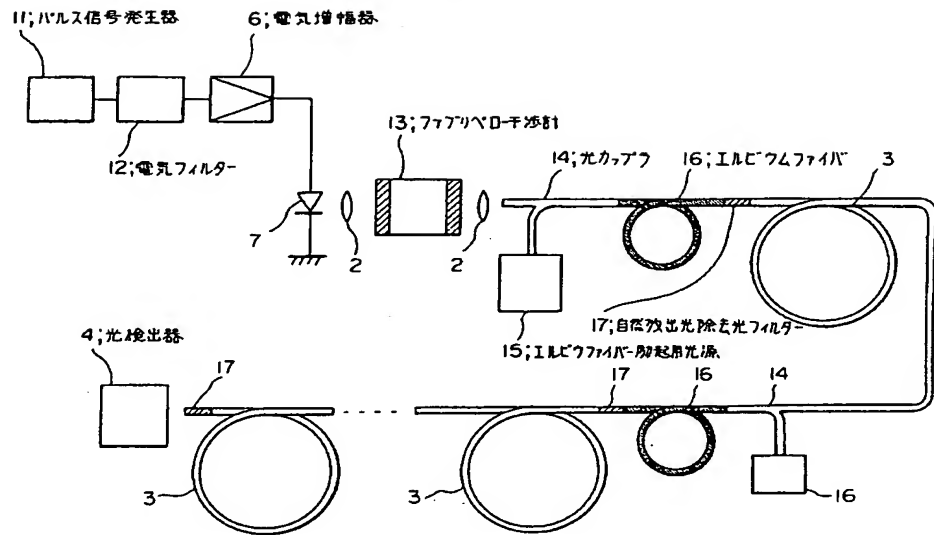
出願人 日本電信電話株式会社

代理人 弁理士 志賀正幸

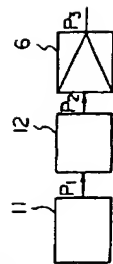


- 1……カラーセンターレーザ、
- 2……結合レンズ、
- 3……ソリトン伝送用ファイバ、
- 4……光検出器、5……正弦波発生器、
- 6……電気増幅器、7……半導体レーザ、
- 8……コムジェネレータ、
- 9……直流電源、10……超高速光変調器、
- 10a……吸収型光変調器、
- 11……パルス信号発生器、
- 12……電気ローパスフィルタ、
- 13……狭帯域光フィルタ  
(ファブリペロー干渉計など)、
- 14……光カップラ、
- 15……エルビウム励起光源、

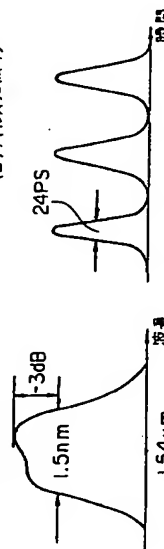
第1図



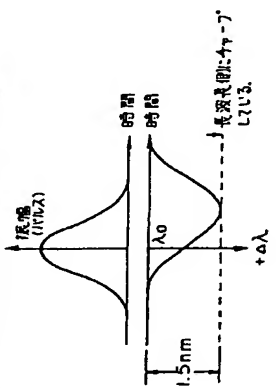
第2図

(イ) P<sub>1</sub>(ロ) P<sub>2</sub> 基本波成分の抽出(ハ) P<sub>3</sub>

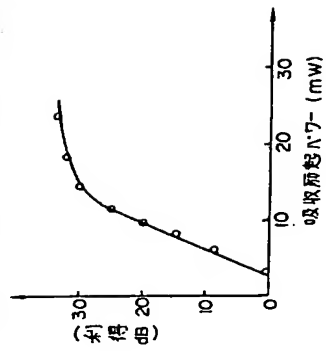
増幅

第3図 半導体レーザーの出力  
(イ)スペクトル (ロ)パルス波形状

第4図 半導体レーザーのチャープ特性

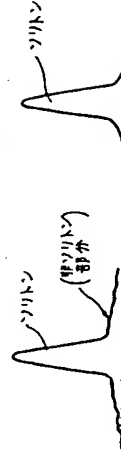


第5図 エルビウムファイバ光増幅特性

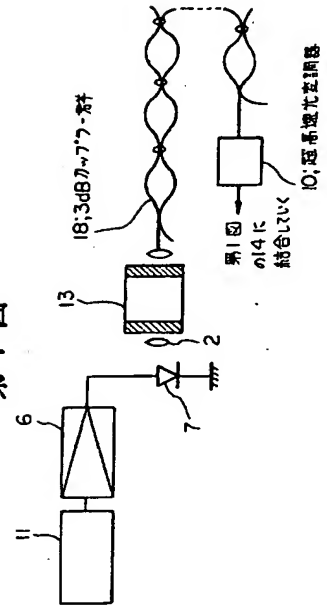


第6図

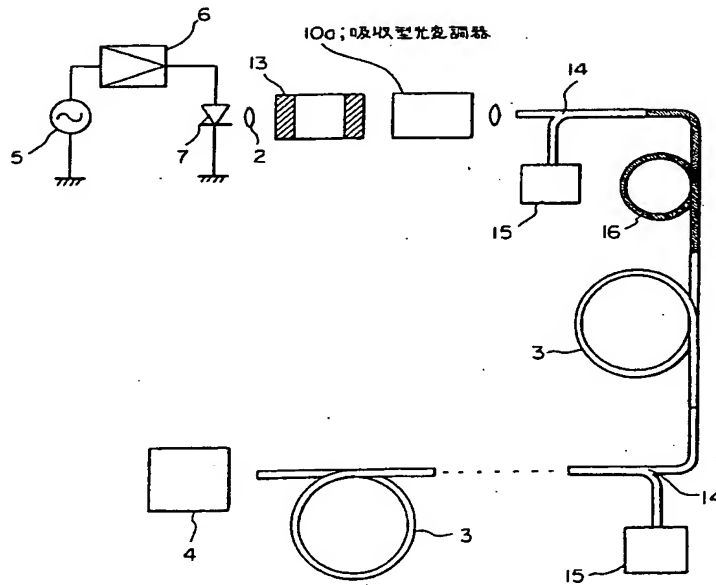
(イ) 通電和吸収体  
通過前



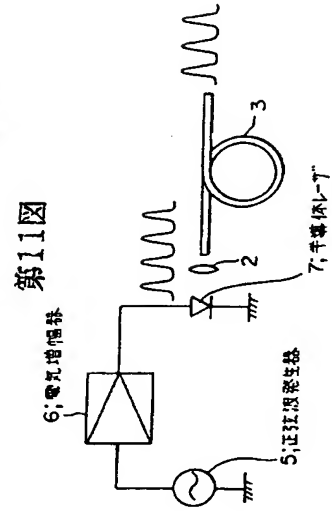
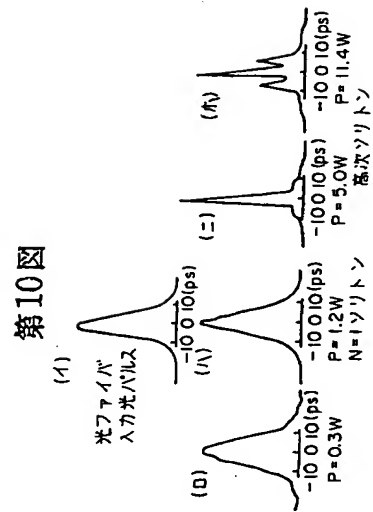
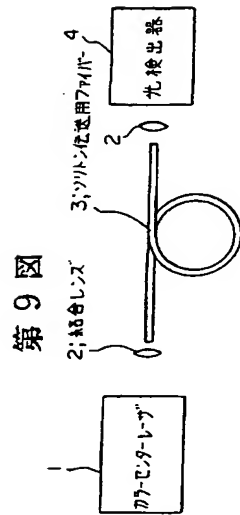
第7図



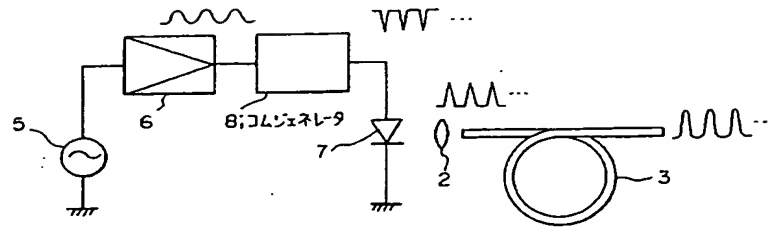
第8図



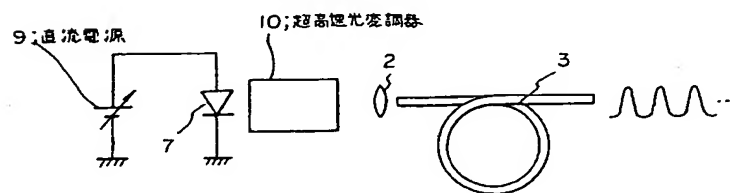




第12図



第13図



-(11) Japanese Unexamined Patent Application Publication No.

3-214123

(43) Publication Date: September 19, 1991

(21) Application No. 2-9546

(22) Application Date: January 19, 1990

(72) Inventors: NAKAZAWA et al.

(71) Applicant: Nippon Telegraph and Telephone Corporation

(74) Agent: Patent Attorney, Masatake SHIGA

#### SPECIFICATION

1. Title of the Invention: PHOTOSOLITON GENERATING METHOD  
AND SOLITON TRANSMITTING METHOD

#### 2. Claims

(1) A photosoliton generating method wherein the optical pulses generated by sinusoidally or impulsively changing the values of the current supplied to the semi-conductor laser are passed through a narrow-band optical filter of bandwidth limitation into the optical pulses so that the product of the pulse width and the spectral width is 0.32 to 0.44, the optical pulses are amplified by using an erbium fiber amplifier, and the photosoliton pulse train is obtained in which the peak output  $P$  is obtained by the formula  $P = 0.776 \times \lambda^2 / \pi^2 n_2 C \times |D| / \tau^2 \times A_{eff}$  (where,  $n_2$ ; the non-linear

refractive index,  $\lambda$ ; the wavelength of the optical pulses,  $\tau$ ; the full width half maximum of the optical pulses,  $|D|$ ; the speed dispersion of the optical fiber to propagate photosolitons,  $A_{eff}$ ; the effective sectional area of the fiber to propagate photosolitons, and  $C$ ; light velocity).

(2) A photosoliton generating method according to Claim 1, wherein a plurality of 3 dB optical couplers of the 1:1 branching ratio for time-sharing are continuously integrated with each other between the narrow-band optical filter and the erbium fiber amplifier, and the time delay is provided to obtain the double photosoliton pulse train.

(3) A photosoliton transmitting method to perform optical communication by generating the coded photosoliton pulse train by the photosoliton generating method according to Claim 1 instead of sinusoidally or impulsively changing the current supplied to the semi-conductor laser, allowing the generated photosoliton pulse train to be passed through a long single mode fiber, and detecting the generated photosoliton pulse train by a high-speed photo-detector.

(4) A photosoliton transmitting method to perform optical communication by coding the photosoliton pulse train obtained by the photosoliton generating method according to

Claim 1 by an absorption type optical intensity modulator using a  $\text{LiNbO}_3$  or MQW (Multiple Quantum Well structure) semiconductor, allowing the coded photosoliton pulse train to pass through a long single mode fiber, and detecting the photosoliton pulse train by a high-speed photo-detector.

### 3. Detailed Description of the Invention

[Technical Field of the Invention] The present invention relates to a photosoliton generating method and a photosoliton transmitting method in which photosoliton pulses which have not been able to generated are generated by the filtering by a simple interferometer, and propagated within optical fibers when generating optical pulses from a semi-conductor laser.

#### [Description of the Related Art]

(1) Fig. 9 explains a photosoliton generating method by a color center laser. In this figure, reference numeral denotes a color center laser to generate optical pulses of a zone of the wavelength of  $1.5 \mu\text{m}$  excited by the mode-locking YAG laser, reference numerals 2 and 2 denote coupling lenses, reference numeral 3 denotes a photosoliton transmission fiber (a single mode fiber), and reference numeral 4 denotes a photo-detection unit.

The pulse width of the optical pulses generated from the color center laser 1 is about 10 pg, and the peak power

thereof reaches as high as 100W, and the pulse power as high as several 10W can be easily excited within the photosoliton transmission fiber 3. The waveform of the fundamental photosoliton expressed by  $N = 1$  has the form of Sech ( $\tau$ ), and because the output waveform from the color center laser 1 is also expressed substantially by Sech ( $\tau$ ), photosoliton pulses can be easily generated. As for photosoliton, refer to the paper "non-linear optics in optical fibers" by NAKAZAWA, Masataka, Ouyo Butsuri, Vol. 56, No. 10, P. 1265 to P.1288 (1987), or "Compression of optical pulses and photosoliton laser", Reiza Kenkyu, Explanation, Vol. 15, No. 11, P. 869-886 (1987).

Fig. 10 shows the change in the waveform of photosoliton obtained by this method. In this condition, the length of the photosoliton transmission fiber 3 is 700 m. Further, the input optical pulses are shown in Fig. 10 (a). Firstly, as shown in Fig. 10(b), if the peak power  $P$  is 0.3W, extension of the pulse width of the output pulse is clearly shown to the optical pulses. As shown in Fig. 10(c), IF the peak power  $P$  is 1.2W, it is understood that the waveform of the output pulse is the same as that of the optical pulses. In other words, in this photosoliton transmission fiber 3, it is shown that  $N = 1$  photosoliton is excited at the peak power  $P = 1.2W$ . On the other hand, as shown in Fig. 10 (d) and (e), if the peak power  $P$  is increased to 5 to 11.4W, it

is clearly shown how high-order photosoliton is excited.

(2) Next, Fig. 11 explains a method for generating short pulses by the sinusoidal modulation. In this figure, reference numeral 5 denotes a method for generating short pulses by sinusoidal modulation. In this figure, reference numeral 5 denotes a sinusoidal generator, reference numeral 6 denotes an electric amplifier, and a reference numeral 7 denotes a semi-conductor laser. The coupling lens 2 and the photosoliton transmission fiber 3 are the same as those in the above configuration.

In this method, the pulse train is generated in a highly repeated manner by performing sinusoidal modulation of the semi-conductor laser 7, and led to the photosoliton transmission fiber 3.

(3) Next, Fig. 12 explains a method for generating short pulses by a comb-generator. As shown in the figure, the comb-generator 8 is inserted between the electric amplifier 6 and the semi-conductor laser 7. The semi-conductor laser 7 is driven by this comb-generator 8 using electric pulses, and the optical pulses are generated in a highly repeated manner.

(4) Next, Fig. 18 explains a method for generating pulses by an optical modulator. As shown in this figure, CW light is taken out by driving the semi-conductor laser 7 by a DC power source 9, and the taken-out CW light is modulated by

the super high-speed optical modulator 10 using the Stark effect of a  $\text{LiNbO}_3$  or MQW (Multiple Quantum Well structure) semi-conductor. The repetitive pulse train of 5-10 GHz is obtained thereby.

[Problems to be Solved by the Invention]

When applying the method in (1) among the above-described known methods, the color center laser 1 is used for generating photosoliton, raising a problem in that this method is difficult from the practical standpoint because the repetition is as low as about 100 MHz and the color center laser is large and expensive.

Further, in the methods (2) and (3), no pulse of idealistic transform limit can be obtained. In other words, the spectral width is expanded widely though the pulses of about 10 to 30 ps can be generated, and the product of the pulse width  $\Delta\tau$  and the spectral width  $\Delta\nu$  becomes  $\Delta\tau\Delta\nu =$  about 1 to 3. This value is considerably separate from the condition of the pulses of the transform limit that  $\Delta\tau\Delta\nu =$  0.32 to 0.44, raising a problem that the pulse is extended by the group velocity dispersion of the fiber 3 if the pulses are propagated in the photosoliton transmission fiber 3 over the long distance, and information cannot be transmitted.

Further, in the method (4), the pulse width is as extensive as 100 ps, realizing no advantages as the

photosoliton.

The present invention has been achieved in light of the above-described circumstances, and an object of the present invention is to provide a photosoliton generating method and a photosoliton transmitting method capable of solving the above-described problems.

[Means for Solving the Problems]

In the present invention, the highly repetitive pulse train obtained by direct modulation of the semi-conductor laser is converted into the pulses of the transform limit by being passed through a Fabry-Perot or Mach-Zender interference filter, and the pulse train is amplified by the erbium fiber amplifier to obtain photosoliton. Then, photosoliton transmission is performed by direct modulation of the obtained photosoliton pulse train.

[Operation]

The highly repetitive pulse train is obtained by direct modulation of the semi-conductor laser. The spectrum of the obtained pulse train is controlled, performing pulsation of the transform limit under the condition that the product of the pulse width  $\Delta\tau$  and the spectrum  $\Delta\nu$ ,  $\Delta\nu\Delta\tau = 0.32$  to  $0.44$ . By performing further optical amplification thereof, the super highly repetitive photosoliton pulse train is obtained. Next, photosoliton transmission is performed by direct modulation of the obtained photosoliton pulse train.



[Embodiments]

The embodiments of the present invention will be described below with reference to the drawings.

Fig. 1 explains a first embodiment of the present invention. The components shown in this figure which are identical to or correspond to those in Figs. 9, 11 and 12 are represented by the same reference numerals, and a detailed description thereof is omitted. In this figure, reference numeral 11 denotes a pulse signal generator, reference numeral 12 denotes an electric low-pass filter to allow only the fundamental wave elements of the pulse signal generator 11, reference numeral 13 denotes a narrow-band optical filter (for example, a Fabry-Perot interferometer and a Mach-Zender interferometer, and the Fabry-Perot interferometer is used in the present embodiment), reference numeral 14 denotes an optical coupler to agree the semiconductor laser beam with the optical signal output from the erbium excitation light source 15, reference numeral 16 denotes the erbium fiber, and reference numeral 17 denotes an optical filter for eliminating amplified spontaneous emission which eliminates amplified spontaneous emission other than the optical pulses of the signals.

In the above-described configuration, firstly, when the pulse signal is output from the pulse signal generator 11, only the fundamental wave elements are taken out by the

electric low-pass filter 12. The fundamental wave elements are amplified by the electric amplifier 6, and supplied to the semi-conductor laser 7 as the semi-conductor laser driving pulse. The semi-conductor laser 7 is driven thereby. Here, Fig. 2 shows how the semi-conductor laser driving pulse to be supplied to the semi-conductor laser 7 is generated. Fig. 2 (a) shows the output waveform of the pulse signal generator 11, and Fig. 2(b) shows the output waveform of the electric low-pass filter 12. Fig. 2(c) shows the output waveform of the electric amplifier 6. On the other hand, Fig. 3 shows the output of the semi-conductor laser 7. Fig. 3(a) shows the spectrum thereof, and Fig. 3(b) shows the time waveform of the pulse. As shown in Figs. 3(a) and (b), the pulse width of  $\Delta\lambda = 1.55$  nm, and the time width of  $\Delta\tau = 24$  ps are obtained in the experiment.

When electrons are injected in the semi-conductor laser 7, the refractive index is reduced, and the laser beam oscillation frequency is once chirped to the long wavelength side once, and returned to the original as shown in Fig. 4 (this is referred to as the negative chirp or the daum-chirp). The pulse of the transform limit means the pulse having the spectrum of only the width obtained by Fourier transformation of the pulse, which includes no surplus spectrum.

Generally speaking, the waveform of the semi-conductor laser is Gauss type, and there is a following relationship between the spectral width  $\Delta\nu$  and the pulse width  $\Delta\tau$ .

$$\Delta\nu\Delta\tau = \Delta\lambda C/\lambda^2 \times \Delta\tau = 0.44 \quad (1)$$

The product  $\Delta\nu\Delta\tau$  of the pulse obtained in Fig. 3 is calculated as follows:

$$\Delta\nu\Delta\tau = 1.5 \times 10^{-2} \times 340^2 / (1.54 \times 10^{-2})^2 \times 24 \times 10^{-12} = 4.6 \quad (2)$$

Comparison with the result of the formula (1) shows that the product is about 10 times larger than the result. Therefore, the pulse obtained by direct modulation is far from the transform limit. This is the essential disadvantage of direct modulation of the semi-conductor laser.

In the present invention, attention is paid to the chirp characteristic of this semi-conductor laser, and the spectrum is turned into the transform limit by using the Fabry-Perot interferometer 13. In this case, the transmission band zone of the Fabry-Perot interferometer 13 is experimentally set to be 0.22 nm, successfully transformed to the pulse of about 17 ps as the Fabry-Perot output. The product  $\Delta\nu\Delta\tau$  of the output is estimated as follows.

$$\Delta\nu\Delta\tau = 0.22 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^2 / (1.54 \times 10^{-6})^2 \times 17 \times 10^{-12} = 0.47 \quad (3)$$

This value is very close to the result of the formula (1), indicating that the pulse of the transform limit is obtained. Originally, the pulse is the chirped one, and a slight chirp is present in principle even with the width of 0.22 nm. In order to completely compensate this chirp, an optical fiber having the normal dispersion for negative chirp compensation may be inserted between the Fabry-Perot interferometer 13 and the optical coupler 14. For example, if the chirp of 2 ps is present in the bandwidth of 0.2 nm, i.e., in a case of 10 ps/nm, this may be realized by setting the length of the optical fiber for permanent compensation to be 200 m by utilizing that the dispersion quantity of the fiber with the zero-dispersion wavelength shifted from 1.6 to 1.8  $\mu\text{m}$  band is 50 ps/km/nm.

As described above, by inserting the Fabry-Perot interferometer 13, the pulse of the transform limit can be obtained. However, the transmission output will be degraded by about 5-10 dB if this state is left as it is. The causes of the degradation include the loss by limiting the spectral width firstly and the transmission loss of the Fabry-Perot interferometer 13 secondly. In the experiment, the free spectrum range of the Fabry-Perot interferometer 13 is set to be about 6 nm in the experiment. In other words, if the

free spectrum range is set to be  $\Delta\lambda$ , and  $L = 200\mu\text{m}$ , it is expressed as follows:

$$\Delta\lambda = C/2L \times (\lambda^2/C) = (1.54 \times 10^{-2})^2/2 \times 200 \times 10^{-6} = 6\text{nm}$$

(4)

Therefore, in the case of Distributed Feedback Laser (DFB), the amplitude of the single spectrum oscillation (including chirp) is about 2 nm at most, and the filter space of 6 nm is sufficient. In other words, no other filter elements are included. Regarding the bandwidth of the Fabry-Perot interferometer 13, finesse may be adjusted from 0.1 mm to about 1 mm by adequately setting the reflectance when constituting the Fabry-Perot interferometer 13.

As described above, the pulse train of the complete transform limit can be obtained though the pulse output is weak.

Next, the pulse train is optically amplified to the power level of the photosoliton pulse train. This is performed by the erbium fiber amplifier (by combining the optical coupler 14, the erbium excitation light source 15 and the erbium fiber 16 with each other). Here, the pulse peak power of the standard photosoliton of  $N = 1$  is defined as  $P_{N=1}$ ,  $P_N$  is expressed as follows:

$$P_{N=1} = 0.776 \times \lambda^3/\pi^2 n_2 C \times |D|/\tau^2 \times A_{\text{eff}} \quad (5)$$

where,  $n_2$  denotes the non-linear refractive index,  $\lambda$

denotes the wavelength of the optical pulses,  $\tau$  denotes the full width half maximum of the optical pulses,  $|D|$  denotes the group velocity dispersion of the photosoliton transmission fiber 3,  $A_{eff}$  denotes the effective sectional area of the photosoliton transmission fiber 3, and  $C$  denotes the light velocity.

For the output of the Fabry-Perot interferometer 13, the peak power is about 1 mW. For the standard of the photosoliton transmission fiber 3 to transmit photosoliton, for example, the dispersion shift fiber of  $|D| = 3\text{ps/km}\cdot\text{ne}$  is used, and  $A_{eff} = 4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$  can be set. In the case of the pulse of the input  $\tau = 20 \text{ ps}$ , and taking into consideration that  $n$  of the silica fiber is  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ ,  $P_{N=1}$  is given as follows.

$$P_{N=1} = 0.776 \times (1.55 \times 10^{-3})^3 / (\pi)^2 \times 3.2 \times 10^{-20} \times 3 \times 10^9 \times 3 \times 10^{-2} / (20 \times 10^{-13})^2 \times 4 \times 10^{-11} = 9.2 \text{ mW} \quad (6)$$

In other words, with the above-described power, Sech type photosoliton of  $N = 1$  can be propagated through the long photosoliton transmission fiber 3.

Next, the required gain of the erbium fiber amplifier may be about 10 dB from the formula (6) and the condition of the input of 1 mW. In this case, as shown in Fig. 5, the gain of 20 dB or over is easily obtained in the erbium fiber of 3 to 100 m, and it is understood that this method is very

effective. Regarding the details of the amplification, refer to "Optical amplification by the optical fiber", By NAKAZAWA, Masataka, Kogaku Vol. 18, No. 6, p. 291 to p. 296.

The wavelength of the erbium excitation light source 15 includes 0.5  $\mu\text{m}$ , 0.6  $\mu\text{m}$ , 0.3  $\mu\text{m}$ , 0.98  $\mu\text{m}$ , and 1.48  $\mu\text{m}$  band. In Fig. 5, 1.48  $\mu\text{m}$  is obtained with the InCaAsP semiconductor laser as the excitation light source.

Here, noise due to the amplified spontaneous emission other than the signal light is eliminated by the optical filter 17 for eliminating amplified spontaneous emission. In addition, non-photosoliton elements for other noise are slightly generated due to losses in the photosoliton transmission fiber 3. However, photosoliton portions are completely transmitted and the non-photosoliton portions are completely absorbed by attaching the super-saturated absorber such as the InGaAs MQW semi-conductor to the filter 17 for eliminating amplified spontaneous emission, and photosoliton can be consistently transmitted. Fig. 6 shows how the photosoliton is transmitted. Fig. 6(a) and Fig. 6(b) show how noise is completely eliminated before and after passing the super-saturated absorber, respectively.

Thus-obtained pulses are propagated as photosoliton through the photosoliton transmission fiber 3, reproduced and relayed by the pre-emphasis method (Japanese Patent Application No. 1-68619, photosoliton generating system, by

KUBOTA, Hirokazu, NAKAZAWA Masataka, and SUZUKI Kazunobu), and finally information is taken out by the photo detector 4, completing the optical communication by photosoliton.

Next, a second embodiment of the present invention will be described. The second embodiment is a method for multiplexing the super-high repetitive photosoliton pulse train to the  $2^{N-1}$  times of the original pulse repetition of the semi-conductor laser 7 on the time axis by using a plurality of optical couplers of 1:1 coupling. Fig. 7 shows the configuration thereof. The semi-conductor laser 7 is pulse-driven by the electric signal which is sinusoidally modulated by the pulse signal generator 11 and the electric amplifier 6, and the spectral elements thereof are narrow-banded, and led to the 3 dB coupler group 18. By using a coupler of N-pole, multiplexing can be realized to  $2^{N-1}$  times on the time axis.

Here, the length of one of two arms of the 3 dB coupler connected for generating time delay and multiplexing pulses is changed. The difference of the length of the arms of the 3 dB coupler is set so that the time delay is  $T/2$  ( $T = 2^i$  ( $i = 1, 2, \dots, N-1$ )). For example, a shift of 1cb may be provided to give the time delay of 50 ps. As described above, pulses can be easily multiplexed. However, in this case, the pulse peak intensity can be reduced to  $1/2$  by being passed through N-pieces of 3 dB couplers, and can be



compensated by the above-described erbium fiber amplifier. In the multiplexing by the method, the signal is turned ON-OFF by the super high-speed optical modulator 10. Super high-speed photosoliton communication can be realized thereby.

Next, Fig. 8 explains a third embodiment of the present invention. Similar to Fig. 7, in place of direct modulation of the semi-conductor laser 7, the absorption type optical modulator 10a using a  $\text{LiNbO}_3$  photo modulator or a MQW semi-conductor is inserted between the Fabry-Perot interferometer 13 and the optical coupler 14, and photosoliton is turned ON-OFF thereby. This method is advantageous in that the semi-conductor laser 7 need not be directly modulated though the absorption type optical modulator 10a must be used.

#### [Advantages]

As described above, the photosoliton pulse of high output at the transform limit which has been impossible in a known method can be generated from a semi-conductor laser by using a narrow-band pass filter such as a Fabry-Perot interferometer and an erbium fiber amplifier, resulting in an advantage of extensive application to the communication using the light intensity modulation. In other words, any high-speed photo modulator by  $\text{LiNbO}_3$  or MQW semi-conductor which has been essential for the known high-speed optical

communication becomes unnecessary, and the semi-conductor laser may be singly and directly modified at a high speed. Therefore, it is advantageous that the photosoliton transmission system becomes very simple.

If the pulse waveform is disturbed when the semi-conductor laser is directly modulated by the pulse code, a high-speed optical modulator may be inserted between a narrow-band pass filter and an erbium fiber amplifier. In this case, the semi-conductor laser is not directly modified, there is a possibility that photosoliton transmission is more consistent.

In addition, even in the super highly repetition such as 30-100 GHz, the photosoliton pulse at the transform limit can be realized so long as the semi-conductor laser can be directly modified in the frequency zone, and the present invention is very effective.

#### 4. Brief Description of the Drawing

Fig. 1 explains a first embodiment of the present invention, Fig. 2 shows a circuit to drive a semi-conductor laser (7) and a waveform diagram to indicate the output of each component thereof, Fig. 3 shows the output waveform diagram of the semi-conductor laser (7), Fig. 4 shows the chirp characteristic of the semi-conductor laser (7), Fig. 5 shows the optical amplification characteristic of erbium

fibers, Fig. 6 explains a method for eliminating non-photosoliton elements by using an over-saturated absorbing body, Fig. 7 explains a second embodiment of the present invention, Fig. 8 explains a third embodiment of the present invention, Fig. 9 explains a method for generating photosoliton by a color center laser (1), Fig. 10 explains the waveform change of photosoliton generated by the configuration shown in Fig. 9, Fig. 11 explains a short pulse generating method by the sinusoidal modulation, Fig. 12 explains a short pulse generating method by a comb-generator, and Fig. 13 explains a pulse generating method by an optical modulator.

- 1 ... color center laser,
- 2 ... coupling lens,
- 3 ... photosoliton transmission fiber
- 4 ... photo detector,    5 ... sinusoidal wave generator
- 6 ... electric amplifier,    7 ... semi-conductor laser,
- 8 ... comb-generator,    9 ... DC power source,
- 10 ... super high-speed optical modulator,
- 10a ... absorption type optical modulator,
- 11 ... pulse signal generator,
- 12 ... electric low-pass filter,
- 13 ... narrow-band optical filter (Fabry-Perot interferometer or the like),

- 14 ... optical coupler,
- 15 ... erbium excitation light source,
- 16 ... erbium fiber,
- 17 ... optical filter for eliminating amplified spontaneous  
emission
- 18 ... 3 dB coupler group

FIG. 1

- 11 PULSE SIGNAL GENERATOR
- 6 ELECTRIC AMPLIFIER
- 12 ELECTRIC FILTER
- 13 FABRY-PEROT INTERFEROMETER
- 14 OPTICAL COUPLER
- 16 ERBIUM FIBER
- 15 LIGHT SOURCE FOR ERBIUM FIBER EXCITATION
- 17 FILTER FOR ELIMINATING AMPLIFIED SPONTANEOUS EMISSION
- 4 PHOTO DETECTOR

FIG. 2

- (A)  $P_1$
- (B)  $P_2$  (EXTRACTION OF FUNDAMENTAL WAVE ELEMENTS)
- (C)  $P_3$  AMPLIFICATION

FIG. 3 OUTPUT OF SEMI-CONDUCTOR LASER

- (A) SPECTRUM
- (B) PULSE ACTUAL WAVEFORM
- (1) WAVELENGTH
- (2) TIME

FIG. 4 CHIRP CHARACTERISTIC OF SEMI-CONDUCTOR LASER

- (1) AMPLITUDE (PULSE)
- (2) TIME
- (3) CHIRPED TO THE LONG WAVELENGTH SIDE

FIG. 5 OPTICAL AMPLIFICATION CHARACTERISTIC OF ERBIUM FIBER

- (1) (GAIN dB)
- (2) ABSORPTION EXCITATION POWER (MW)

FIG. 6

- (A) BEFORE PASSING SUPER-SATURATED ABSORBER
- (B) AFTER PASSING SUPER-SATURATED ABSORBER
- (1) PHOTOSOLITON
- (2) (NON-PHOTOSOLITON PORTION)

FIG. 7

- 18 3 dB COUPLER GROUP
- (1) TO BE COUPLED WITH 14 IN FIG. 1
- 10 SUPER HIGH-SPEED PHOTO-MODULATOR

FIG. 8

10a    ABSORPTION TYPE PHOTO DETECTOR

FIG. 9

- 1      COLOR CENTER LASER
- 2      COUPLING LENS
- 3      PHOTOSOLITON TRANSMISSION FIBER
- 4      PHOTO DETECTOR

FIG. 10

- (A) OPTICAL FIBER INPUT OPTICAL PULSE
- (B)
- (C)  $N = 1$  PHOTOSOLITON
- (D) HIGH ORDER PHOTOSOLITON
- (E)

FIG. 11

- 6      ELECTRIC AMPLIFIER
- 5      SINUSOIDAL WAVE GENERATOR
- 7      SEMI-CONDUCTOR LASER

FIG. 12

8 COMB GENERATOR

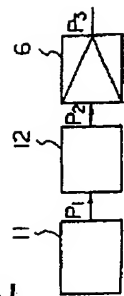
FIG. 13

9 DC CURRENT

10 SUPER HIGH-SPEED PHOTO MODULATOR



Fig. 2



(A)  $P_1$

(B)  $P_2$

(C)  $P_3$

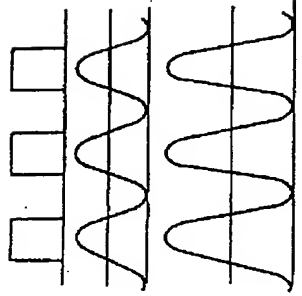


Fig. 3

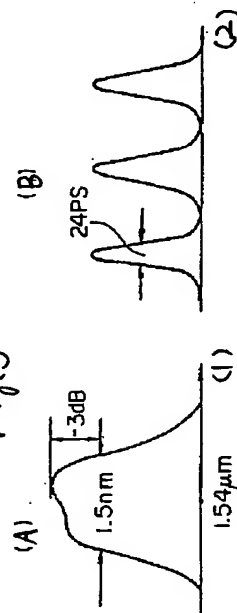


Fig. 4

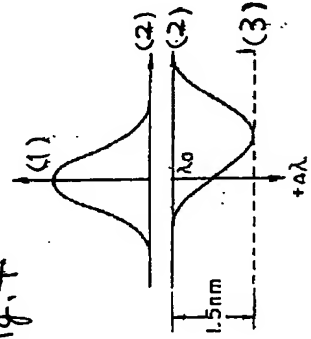


Fig. 1

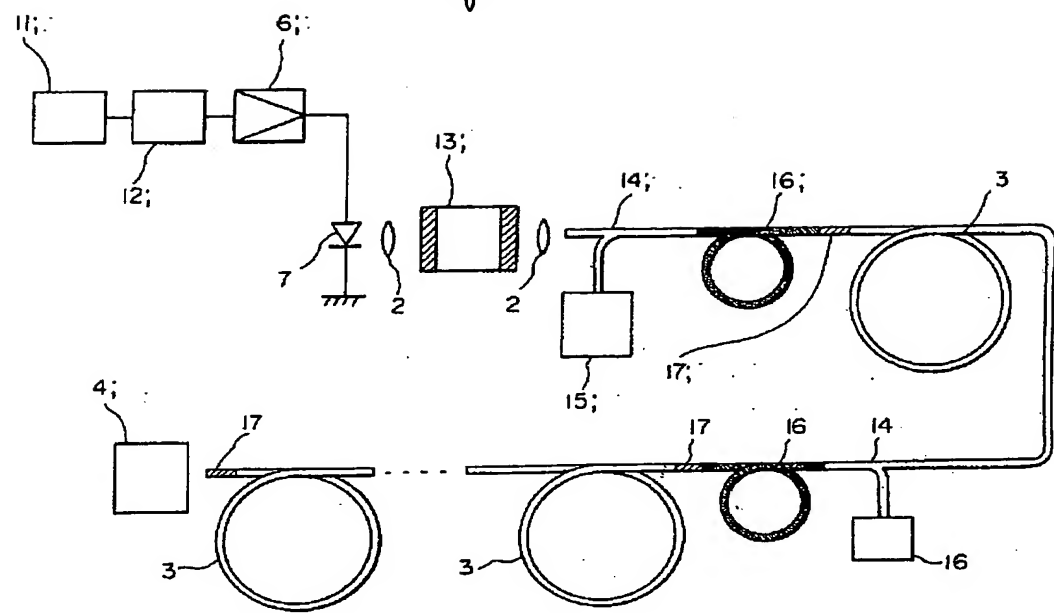


Fig. 5

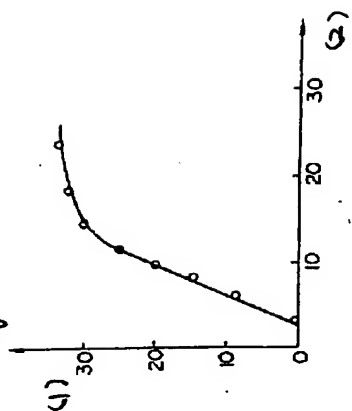


Fig. 6

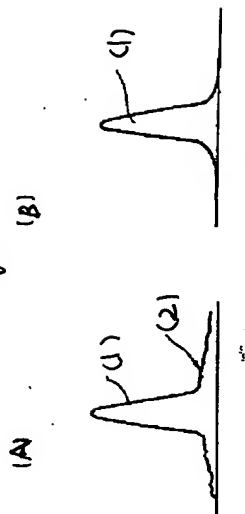


Fig. 7

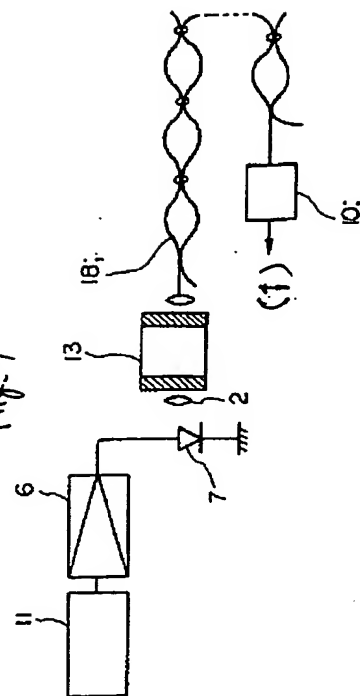


Fig. 8

